



# **Projet CITADEL: RÉCAPITULATIF DES MÉTHODES D'ÉVALUATION DE L'ERGONOMIE ET DU CONFORT VISUELS**

Michel Garcia, Michel Perraudau, Christophe Martinsons, Samuel Carré

## **► To cite this version:**

Michel Garcia, Michel Perraudau, Christophe Martinsons, Samuel Carré. Projet CITADEL: RÉCAPITULATIF DES MÉTHODES D'ÉVALUATION DE L'ERGONOMIE ET DU CONFORT VISUELS. Rapport CSTB No RAP2 26019632 Ref. DAE 3E 2010-249/CM/EB, CSTB - Centre scientifique et technique du bâtiment, France. 2009. <hal-04763088>

**HAL Id: hal-04763088**

**<https://hal.science/hal-04763088v1>**

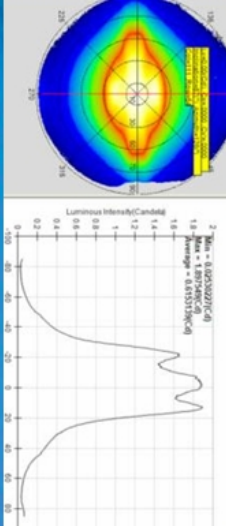
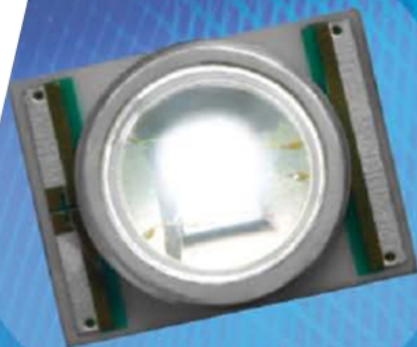
Submitted on 13 Jan 2025

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY 4.0 - Attribution - International License



Offre n° 26019632

Affaire n° ER-712-090001-712-NOV

## PROJET CITADEL CONVENTION ADEME N° 807C0073

Tâche T2  
JALON J2.2.1

### RÉCAPITULATIF DES MÉTHODES D'ÉVALUATION DE L'ERGONOMIE ET DU CONFORT VISUELS

Michel GARCIA, Michel PERRAUDEAU, Samuel CARRÉ, Christophe MARTINSONS

Christophe MARTINSONS, CSTB, coordinateur CITADEL

#### Partenaires



**Demandeur de l'étude**  
Bruno LAFITTE  
ADEME Sophia Antipolis  
500 route des Lucioles  
06560 VALBONNE

**ADEME**



Agence de l'Environnement  
et de la Maîtrise de l'Energie

N/Réf. DAE/3E/N° 2010-249/CM/EB

Auteur(s)	Approbation	Vérificatrice
Michel GARCIA	Christophe MARTINSONS	Édith BRUNELIÈRE
Michel PERRAUDEAU		
Samuel CARRE		
Christophe MARTINSONS		

***CONFIDENTIALITE RENFORCEE***

**CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT**

ÉTABLISSEMENT DE GRENOBLE | 24 RUE JOSEPH FOURIER | 38400 SAINT-MARTIN D'HÈRES  
TÉL. (33) 04 76 76 25 25 | FAX. (33) 04 76 44 20 46 | SIRET 775 688 229 000 50 | [www.cstb.fr](http://www.cstb.fr)

SIÈGE SOCIAL > 84 AVENUE JEAN JAURÈS | CHAMPS-SUR-MARNE | 77447 MARNE-LA-VALLÉE CEDEX 2

ÉTABLISSEMENT PUBLIC À CARACTÈRE INDUSTRIEL ET COMMERCIAL | RCS MEAUX 775 688 229 | TVA FR 70 775 688 229

MARNE-LA-VALLÉE | PARIS | GRENOBLE | NANTES | SOPHIA-ANTIPOLIS

---

## SOMMAIRE

---

<b>1 - INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>2 - NIVEAU D'ÉCLAIREMENT SUR LE PLAN DE TRAVAIL .....</b>	<b>1</b>
<b>3 - UNIFORMITÉ DE L'ÉCLAIREMENT SUR LE PLAN DE TRAVAIL .....</b>	<b>4</b>
<b>4 - ÉQUILIBRE DES LUMINANCES DANS LE CHAMP VISUEL.....</b>	<b>4</b>
<b>5 - LA NOTION D'ÉBLOUISSEMENT.....</b>	<b>7</b>
<b>6 - ÉBLOUISSEMENT D'INCAPACITÉ (OU ÉBLOUISSEMENT PERTURBATEUR) .....</b>	<b>9</b>
<b>7 - ÉBLOUISSEMENT D'INCONFORT .....</b>	<b>11</b>
<b>8 - SOLUTIONS POUR ÉVITER L'ÉBLOUISSEMENT .....</b>	<b>12</b>
<b>9 - ÉVALUATION DE L'ÉBLOUISSEMENT .....</b>	<b>14</b>
9.1 - Les abaques de Bodmann et Söllner.....	14
9.2 - CGI, CIE Glare Index .....	15
9.3 - UGR, Unified Glare Rating.....	16
<b>10 - COULEUR ET INDICE DE RENDU DES COULEURS DES SOURCES .....</b>	<b>19</b>

---

## 1 - INTRODUCTION

---

Les exigences concernant l'ergonomie et le confort visuels en éclairage intérieur sont décrites dans la norme européenne NF EN 12464-1 "Éclairage des lieux de travail – Partie 1 : lieux de travail intérieur". Ainsi, toute installation d'éclairage devrait être conçue de manière à satisfaire les prescriptions données par cette norme selon le type d'activité concernée. Des prescriptions très précises de confort visuel figurent également dans la norme française d'ergonomie visuelle NF X 35-103.

Pour qu'un éclairage soit réalisé correctement et bien accepté par les usagers, il est important qu'en plus du niveau d'éclairement à maintenir sur le plan de travail (niveau exprimé en lux), les besoins quantitatifs et qualitatifs soient satisfaits. Les trois critères de qualité de l'environnement lumineux sont :

- ✧ le confort visuel : la sensation de bien-être ressentie par les usagers permet la pratique aisée d'activités manuelles usuelles ;
- ✧ la performance visuelle : les personnes sont en mesure d'exécuter des tâches visuelles de qualité, même dans des circonstances difficiles et pendant de longues périodes ;
- ✧ l'absence de risques photobiologiques sur l'œil et la peau (endommagement des tissus par la lumière visible, ainsi que les éventuelles composantes ultraviolettes et infrarouges).

En éclairage intérieur, l'analyse de l'environnement lumineux se fait par l'intermédiaire de plusieurs paramètres : niveau d'éclairement sur le plan de travail, uniformité de l'éclairement sur le plan de travail, équilibre des luminances dans le champ visuel, éblouissement par les sources directes ou indirectes et indice de rendu des couleurs de la lumière. L'indice de rendu des couleurs fait l'objet de la tâche 2.3 du projet CITADEL.

---

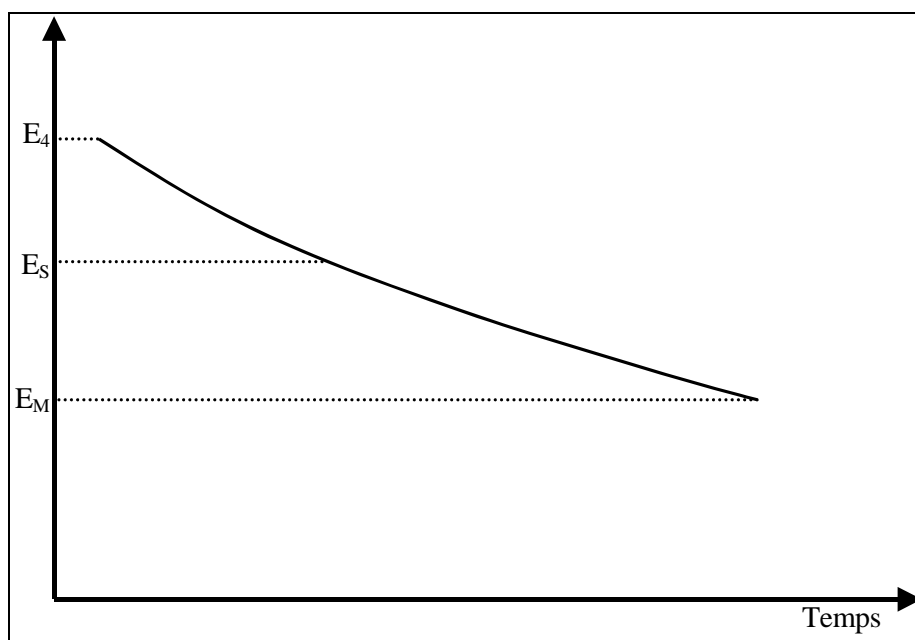
## 2 - NIVEAU D'ÉCLAIREMENT SUR LE PLAN DE TRAVAIL

---

Par convention, en éclairage intérieur, le plan de travail (ou plan utile) est un plan horizontal. Si le plus souvent ce plan se trouve à une certaine hauteur par rapport au sol, il est confondu avec le sol pour certaines zones (les circulations principalement). L'éclairement considéré sur ce plan est un éclairement moyen obtenu à partir de valeurs en des points liés à l'implantation des luminaires ; le positionnement de ces points doit permettre de rendre compte des valeurs maximales (en général à l'aplomb des luminaires) et des valeurs minimales.

En raison de l'évolution dans le temps des caractéristiques des sources, des luminaires et des revêtements de parois, on est amené à distinguer trois éclairagements moyens sur le plan de travail :

- ✧ **l'éclairement moyen initial  $E_4$**  : correspond à une installation neuve, c'est-à-dire avec des lampes et des luminaires neufs et avec des caractéristiques des revêtements de parois qui sont mis en place lors de l'installation des luminaires. Quand on fait appel à un outil de calcul pour dimensionner ou vérifier un éclairage intérieur, cet éclairement est celui obtenu en utilisant, pour les lampes et luminaires, les données fournies par les fabricants dans leurs catalogues.
- ✧ **l'éclairement moyen à maintenir  $E_M$**  : correspond à la valeur de l'éclairement juste acceptable avant une intervention d'entretien. Ce sont des éclairements à maintenir qui sont maintenant donnés dans les différentes normes et recommandations.
- ✧ **l'éclairement moyen en service  $E_S$**  : correspond à la valeur moyenne de l'éclairement initial et de l'éclairement à maintenir. C'est cet éclairement qui apparaissait précédemment dans les normes et recommandations.



**Évolution de l'éclairement intérieur avec le temps**

L'éclairement initial et l'éclairement à maintenir sont reliés par un coefficient qui tient compte de l'évolution temporelle des "performances" du couple lampe/luminaire et du local ; ce coefficient est appelé facteur de maintenance (noté M) et :

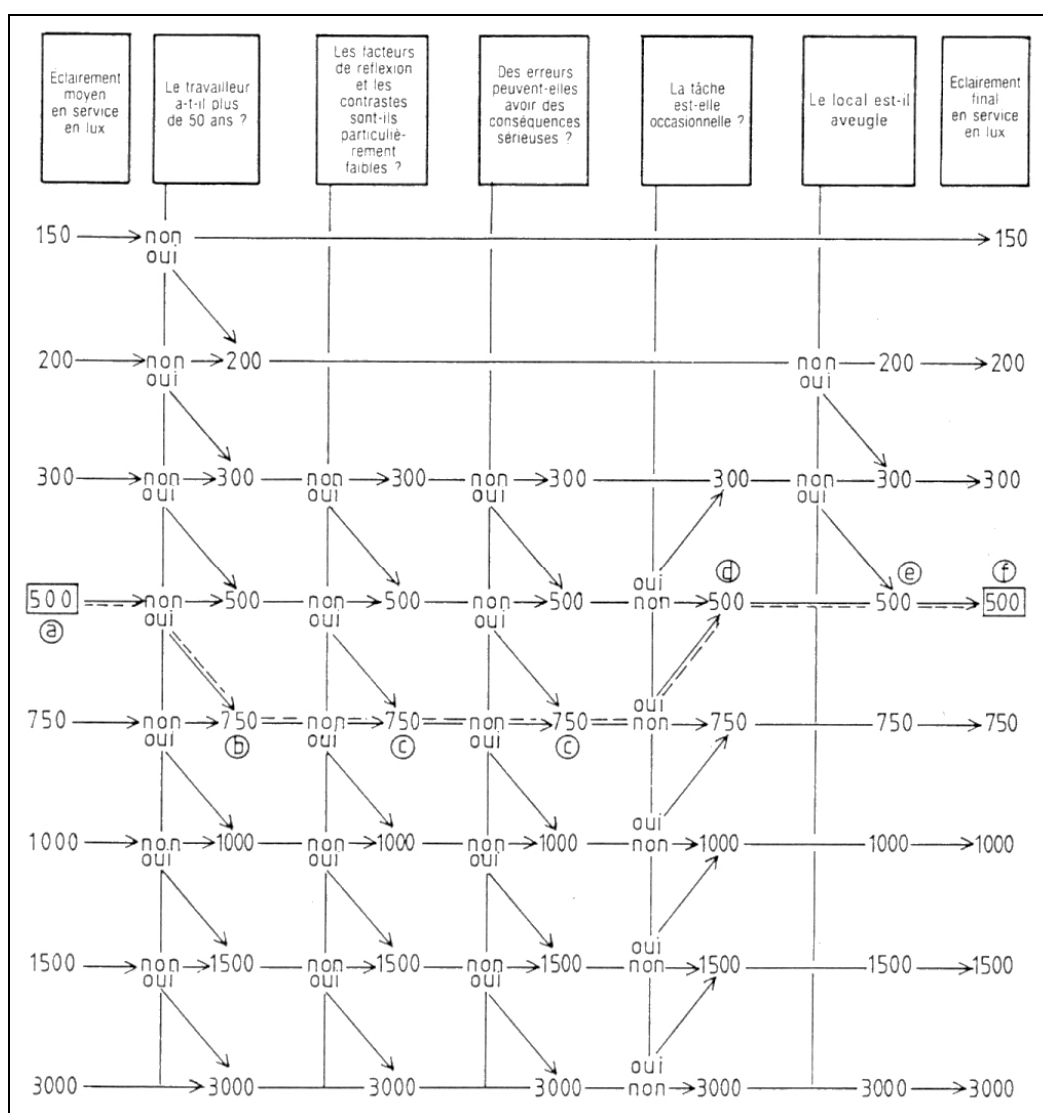
$$E_M = M \times E_4$$

En l'absence d'indications particulières sur le niveau d'empoussièrement dans le local, la valeur par défaut du facteur de maintenance est celle du tableau suivant :

NIVEAU D'EMPOUSSIEREMENT DANS LE LOCAL	FACTEUR DE MAINTENANCE
Faible	1 / 1,5
Moyen	1 / 1,7
Fort	1 / 2,0

### Valeurs par défaut du facteur de maintenance

Les valeurs d'éclairage des normes et recommandations (l'éclairage à maintenir) doivent être pondérées par quelques facteurs ; la figure suivante, tirée de la norme NF X 35-103 donne cette information de pondération.



### Modifications à apporter aux éclairagements recommandés en fonction des conditions rencontrées (Norme NF X 35-103)

---

### 3 - UNIFORMITÉ DE L'ÉCLAIREMENT SUR LE PLAN DE TRAVAIL

---

L'uniformité de l'éclairage sur le plan de travail est caractérisée par le facteur d'uniformité défini comme étant le rapport entre la valeur minimale  $E_{\text{mini}}$  (au point le moins éclairé de ceux ayant servi à obtenir la valeur moyenne) et la valeur moyenne  $E_{\text{moy}}$ .

Pour qu'une installation d'éclairage artificiel soit considérée comme satisfaisante, il ne faut pas que le facteur d'uniformité soit inférieur à 0,7 sur la zone de tâche. L'uniformité sur la zone environnante proche doit être d'au moins 0,5. Ces valeurs sont celles de la norme européenne NF EN 12464-1 (2003). Dans le projet de révision de cette norme (Pr NF EN 12464-1 de 2010), la valeur de l'uniformité de la tâche visuelle dépend de l'activité, par exemple de 0,6 à 0,7 pour les activités de bureau. Pour les zones environnantes les valeurs limites sont de 0,4 pour la zone environnante proche et de 0,1 pour la zone environnante lointaine.

---

### 4 - ÉQUILIBRE DES LUMINANCES DANS LE CHAMP VISUEL

---

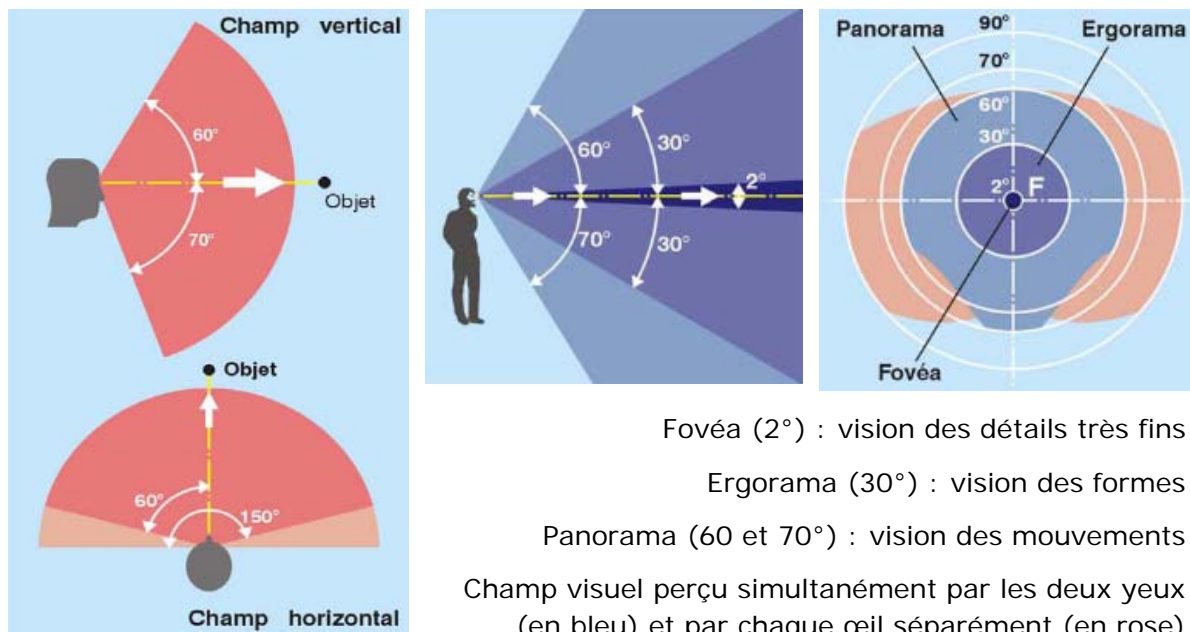
La distribution des luminances dans un espace doit être telle que les rapports excessifs de luminance soient évités pour permettre aux occupants de voir correctement. Des zones extrêmement sombres ou brillantes donnent naissance à l'inconfort visuel et doivent être évitées. En effet, lorsqu'il y a de grandes différences de luminance dans le champ visuel (voir l'encadré ci-après pour la définition de "champ visuel"), l'œil doit s'adapter lorsque la direction du regard change. Pendant son adaptation, l'acuité visuelle est diminuée. Pour éviter de telles fatigues inutiles, il convient de ne pas dépasser certaines valeurs de contraste entre les différentes zones du champ visuel.

A l'inverse, si les différences entre les niveaux de luminance sont trop faibles, on crée dans le local une impression de monotonie très désagréable.



### Définition du champ visuel

Le champ visuel est l'espace délimité par la perception spatiale de l'œil, sans bouger la tête.



La perception des détails d'une tâche visuelle est facilitée par les contrastes de luminance et de couleur entre ces détails et l'arrière-fond. De plus, un contraste suffisant devrait être appliqué pour favoriser la perception du relief des objets. Il s'agit donc de trouver un compromis entre ces exigences.

Trois paramètres sont à considérer : le voisinage de la tâche visuelle, le rapport entre murs et plan de travail et le rapport entre mur et plafond.

En raison des difficultés liées à la mesure des luminances, ces critères d'équilibre des luminances peuvent s'exprimer en se référant au facteur de réflexion et à l'éclairement.

### AU VOISINAGE DE LA TÂCHE VISUELLE

Si on considère que l'éclairement du plan de travail est uniforme que son revêtement et celui de la tâche visuelle sont parfaitement mats, il faut, autant que possible, que le facteur de réflexion  $\rho_v$  au voisinage de la tâche visuelle respecte

$$\frac{1}{3} \leq \frac{\rho_v}{\rho_t} < 1$$

où  $\rho_t$  est le facteur de réflexion de la tâche visuelle.

### RAPPORT ENTRE MURS ET PLAN DE TRAVAIL

Il est recommandé que le facteur de réflexion des murs soit compris entre 0,3 et 0,7.

On considère en général que, pour être bien perçu par les occupants d'un local, le rapport entre l'éclairement (vertical) moyen sur les murs  $E_3$  et l'éclairement (horizontal) moyen sur le plan de travail  $E_4$  doit respecter la règle suivante :

$$0,5 < \frac{E_3}{E_4} < 0,8$$

En fait, la "fourchette" acceptable pour le rapport  $E_3/E_4$  dépend à la fois du facteur de réflexion des murs et du niveau d'éclairement sur le plan de travail. Dans le cas général (couleur des murs à dominante non jaune), on obtient les valeurs limites du tableau suivant :

FACTEUR DE RÉFLEXION DES MURS	LUMINANCE DE LA TÂCHE VISUELLE (en cd/m²)					
	50	100	150	200	250	400
<b>0,3</b>	175 (0,88)	310 (0,78)	430 (0,72)	550 (0,67)	670 (0,67)	1 060 (0,66)
	365 (1,33)	470 (1,18)	645 (1,08)	820 (1,03)	1 000 (1,00)	1 600 (1,00)
<b>0,5</b>	145 (0,73)	260 (0,65)	370 (0,62)	485 (0,61)	600 (0,60)	950 (0,59)
	220 (1,10)	395 (0,99)	555 (0,91)	725 (0,91)	895 (0,90)	1 420 (0,89)
<b>0,7</b>	130 (0,65)	235 (0,59)	340 (0,57)	450 (0,56)	560 (0,56)	895 (0,56)
	195 (0,98)	350 (0,88)	510 (0,85)	675 (0,84)	840 (0,84)	1 340 (0,84)
	<b>200</b>	<b>400</b>	<b>600</b>	<b>800</b>	<b>1 000</b>	<b>1 600</b>
ÉCLAIREMENT DE LA TÂCHE VISUELLE (en lx) POUR UN FACTEUR DE RÉFLEXION DE LA TÂCHE VISUELLE DE 0,8						

Valeurs limites des éclairagements sur les murs  $E_3$  et du rapport  $E_3/E_4$  (entre parenthèses)

Norme NF X 35-103

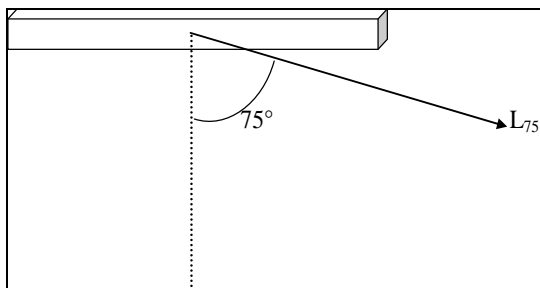
#### RAPPORT ENTRE PLAFOND ET PLAN DE TRAVAIL

Le facteur de réflexion du plafond doit être supérieur ou égal à 0,7.

Pour que la situation soit jugée satisfaisante, le rapport entre l'éclairement moyen du plafond  $E_1$  et l'éclairement moyen du plan de travail  $E_4$  doit respecter, si possible, la règle suivante :

$$0,3 \leq \frac{E_1}{E_4} \leq 0,9$$

En complément à cette règle sur les éclairagements, le rapport entre la luminance  $L_{75}$  du luminaire et la luminance moyenne du plafond  $L_1$  est associé à la notion de classe de qualité de l'installation d'éclairage artificiel, conformément au tableau suivant :



**Définition de la luminance  $L_{75}$  d'un luminaire**

CLASSE DE QUALITÉ	$L_{75}/L_1$
A	20
B	30
C	40
D	50
E	60

**Valeurs du rapport  $L_{75}/L_1$  associées aux classes de qualité**

On exprime également parfois les exigences d'équilibre des luminances en utilisant directement les rapports de luminance. Les rapports maximaux recommandés sont les suivants :

Tâche visuelle – Plan utile : 3 : 1

Tâche visuelle – Environnement : 10 : 1

## 5 - LA NOTION D'ÉBLOUISSEMENT

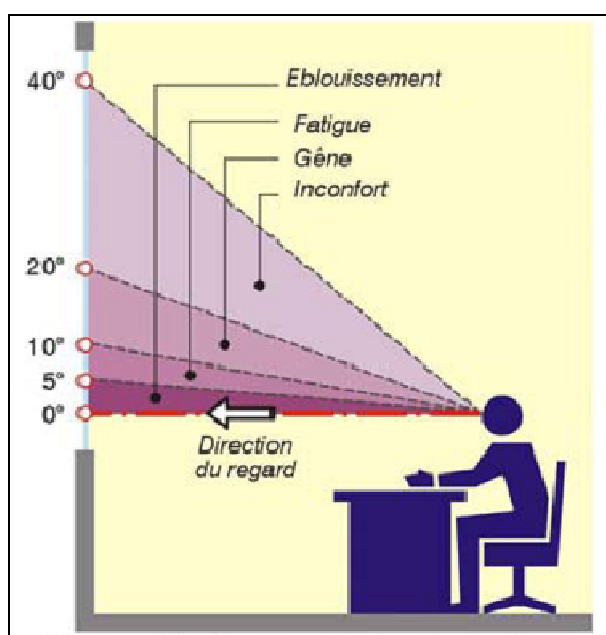
Le terme "éblouissement" recouvre des phénomènes très divers ressentis dans la vie courante. S'il fallait en dresser une liste, on pourrait dire que la situation est trop lumineuse, aveuglante, irritante, gênante, perturbatrice, inconfortable, que les contrastes sont trop violents, que les objets sont recouverts d'un voile, que le sujet souffre d'incapacité, d'une lacune fixe dans le champ visuel (scotome). La description qu'en donnent les observateurs est généralement accompagnée d'une plainte.

La CIE, suivant les recommandations de Stiles (1929) formulées il y a déjà plus de 80 ans, a établi la distinction entre l'éblouissement d'incapacité qui provoque une dégradation des performances visuelles, et l'éblouissement d'inconfort qui provoque un désagrément, le premier étant quantifiable, le second étant complexe et mal défini (CIE, 1978, Vocabulaire 845-02-56 et 57).

Dans la pratique, la distinction entre ces deux éblouissements n'est en général pas évidente à faire. Quand on cherche à réduire l'éblouissement d'inconfort, on réduit aussi l'éblouissement perturbateur.

La figure suivante présente les zones angulaires définissant les notions d'éblouissement pour différentes positions de la source lumineuse (à 0, 5, 10, 20 et 40° par rapport à l'horizontale). Comme la partie fovéale de l'œil humain est très sensible à des hauts niveaux de luminance, il existe une différence considérable entre les luminances maximales acceptées par l'œil au centre du champ de vision et en périphérie. À 40°, la luminance tolérable est de l'ordre de 7 000 cd/m<sup>2</sup> alors qu'à l'horizontale la luminance tolérable est de 1 500 cd/m<sup>2</sup>. En éclairage intérieur, on admet généralement que des luminances supérieures à 10 000 cd/m<sup>2</sup> conduisent toujours à un éblouissement d'inconfort.

Notons que la norme française d'ergonomie visuelle NF X 35-103 stipule que lorsqu'une source présente une surface apparente très réduite dans la zone de travail du champ visuel, sa luminance ne doit pas dépasser 2 000 cd/m<sup>2</sup> (en éclairage intérieur).



#### Zones angulaires définissant les notions d'éblouissement

Le contrôle des luminances dans le champ visuel implique, dans la plupart des cas, que les luminaires ne soient pas éblouissants, c'est à dire que la source de lumière (lampe) ne soit pas vue directement par les usagers. La lampe nue est souvent susceptible de constituer une source d'éblouissement. Pour mémoire, une lampe à incandescence claire peut avoir une luminance de 1 000 000 cd/m<sup>2</sup>, alors qu'une lampe dépolie aura une luminance de 50 000 cd/m<sup>2</sup>. Les valeurs de luminances de la figure suivante, montrent qu'en pratique aucune source d'éclairage artificiel ne peut être vue directement sans l'utilisation d'un système optique de filtrage ou de défilement.

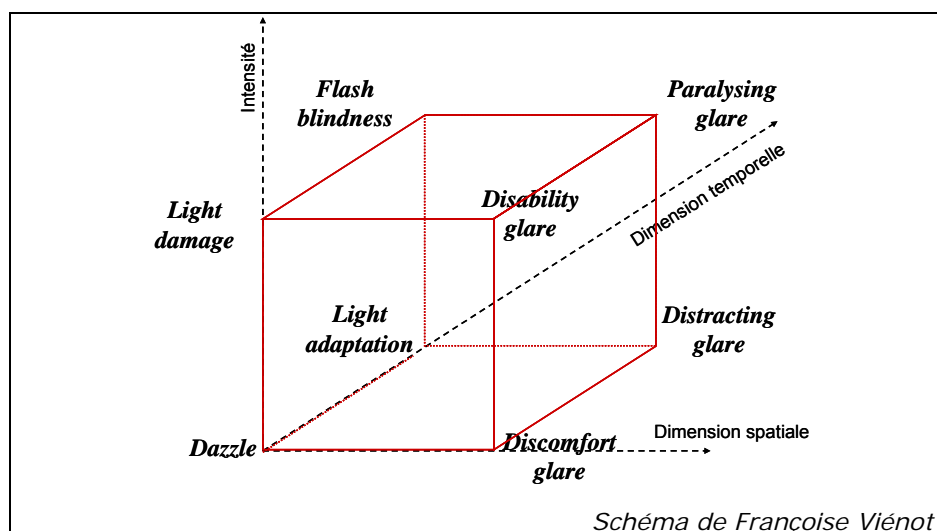


### Valeurs indicatives des luminances de sources lumineuses

J.J Vos propose en 1999 (Vos J.J., 1999, Glare today in historical perspective : towards a new CIE glare observer and a new glare nomenclature. CIE 24th session, Warsaw 99, vol. 1, pp. 38-42) d'identifier les situations éblouissantes, d'établir une nomenclature et de les classer dans un cadre selon trois dimensions le long desquelles le désagrément augmente :

- ✧ une dimension spatiale, allant de la localisation en périphérie à la fixation fovéale
- ✧ une dimension temporelle, allant d'un effet stable à un effet transitoire
- ✧ une dimension quantitative, allant de l'inconfort jusqu'à l'incapacité

Il construit alors un cube, aux sommets duquel il place des situations éblouissantes bien individualisées :

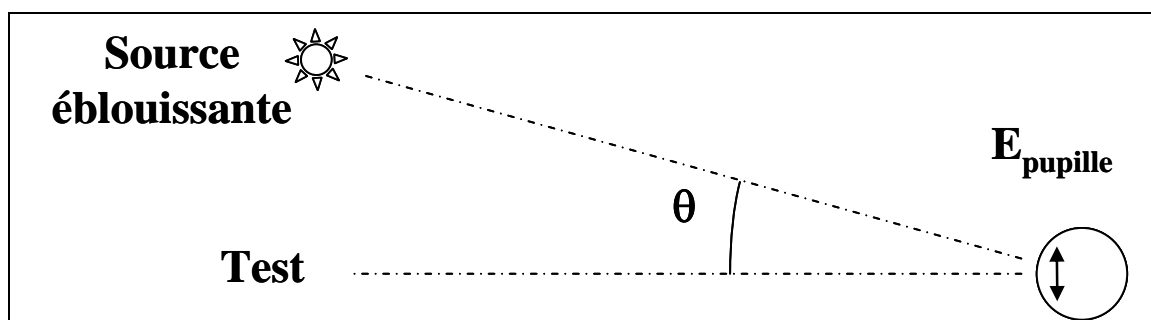


## 6 - ÉBLOUISSEMENT D'INCAPACITÉ (OU ÉBLOUISSEMENT PERTURBATEUR)

Cet éblouissement est provoqué par la vision directe d'une source de lumière de forte luminance et qui produit également un éclairage important dans le plan de l'œil, ce qui provoque un effet perturbateur. La source éblouissante crée autour d'elle comme un voile qui amoindrit le contraste dans son environnement. L'éblouissement d'incapacité apparaît

en présence de luminaires de flux important, le plus souvent en éclairage extérieur (éclairage sportif, éclairage automobile, projecteurs, etc.) mais aussi en éclairage scénographique. L'éblouissement d'incapacité n'entraîne pas une diminution immédiate de la performance visuelle. Cet éblouissement ne provoque pas nécessairement une sensation désagréable ou une gêne perceptible.

Pour estimer l'éblouissement d'incapacité on évalue le rapport de la luminance équivalente  $L_{\text{équivalente}}$  du voile à l'éclairement dans le plan de l'œil  $E_{\text{pupille}}$ .



**Géométrie de la situation avec source éblouissante**

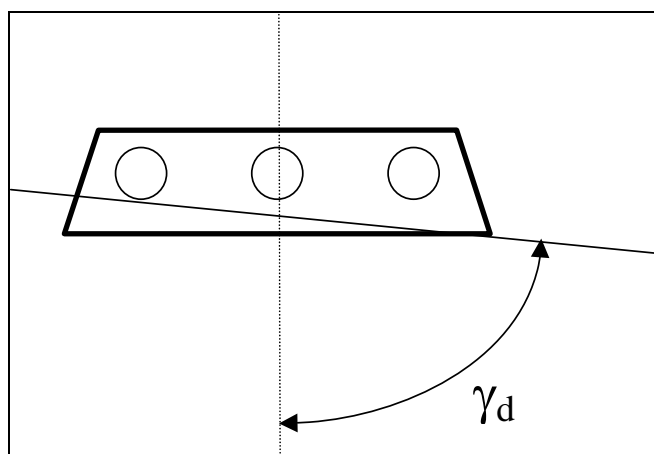
La luminance équivalente du voile est très élevée au voisinage immédiat de la source, et décroît à mesure que le regard s'en éloigne. Il est admis que la dégradation des performances visuelles due à l'éblouissement a pour origine la diffusion de lumière parasite dans les milieux oculaires : à la surface de la cornée, dans le cristallin et dans la rétine. La diffusion de la lumière par le cristallin augmente notablement avec l'âge, d'où l'intérêt d'apporter une correction pour l'âge qui devient effective au-delà de 60 ans.

Il convient de prendre en compte la pigmentation de l'iris de l'observateur, en introduisant un paramètre  $p$  valant 0 pour les yeux noirs, 0,5 pour les yeux marrons et 1,2 pour les yeux bleus. J.J. Vos a proposé en 1999 une formule, valable pour des valeurs de  $\theta$  entre  $0,1^\circ$  et  $100^\circ$ .

$$\frac{L_{\text{équivalente}}}{E_{\text{pupille}}} = \frac{10}{\theta^3} + \left[ \frac{5}{\theta^2} + \frac{0,1 p}{\theta} \right] \left[ 1 + \left( \frac{\text{Age}}{62,5} \right)^4 \right] + 2,5 \cdot 10^{-3} p$$

La luminance de voile permet de calculer les indices TI et GR, très utilisés pour qualifier les situations d'éblouissement en éclairage extérieur.

L'éblouissement d'incapacité étant lié à la présence des sources lumineuses dans le champ visuel, on peut l'associer à la notion d'angle de défilement (noté  $\gamma_d$ ) qui correspond à l'angle au-delà duquel les sources ne sont plus directement visibles. La valeur de l'angle  $\gamma_d$  dépend de la classe de qualité du luminaire.



### Définition de l'angle de défilement

Des valeurs limites pour l'angle de défilement sont données dans les recommandations de l'AFE (Association Française de l'Éclairage) et dans la norme européenne NF EN 12464-1. En étant plus stricte (valeur seuil de  $\gamma_d$  plus importante) pour les classes de qualité A, B et C, les recommandations de l'AFE assurent une très bonne protection pour les locaux et activités "sensibles".

TYPE DE LAMPE	LUMINANCE MOYENNE DE LA LAMPE NUE (kcd/m <sup>2</sup> )	ANGLE DE DÉFILEMENT $\gamma_d$		
		Publication AFE		Norme NF EN 12464-1
		Classes A, B et C	Classes D et E	
Lampes fluorescentes tubulaires	$\leq 20$	70°	80°	80°
Lampes à décharge avec ballon fluorescent ou globe diffusant	20 à 500	60°	70°	70°
Lampes à décharge à ampoule claire ou lampes à incandescence standard claire	$\geq 500$	60°	60°	60°

### Angles de défilement des luminaires en fonction du type de lampe

## 7 - ÉBLOUISSEMENT D'INCONFORT

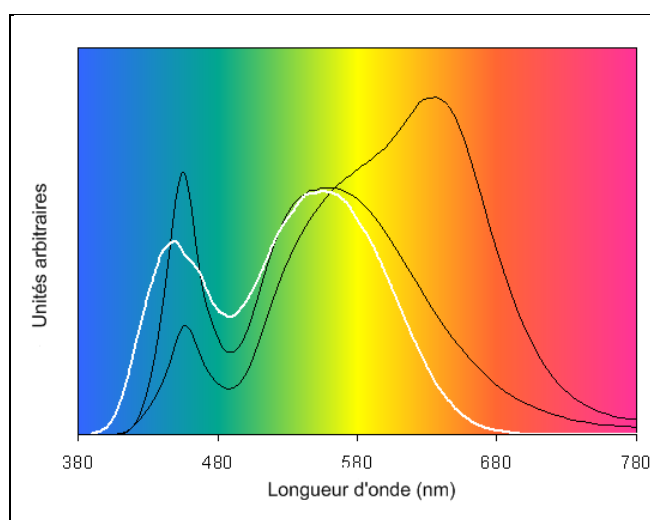
Cet éblouissement est provoqué par la vision d'une tache dont le contraste est trop élevé compte tenu de l'état d'adaptation à la lumière de l'observateur. Il s'évalue à l'aide d'abaques et d'indices dont le détail sera exposé plus loin dans le document. A partir d'expérimentations au sein de la CIE, il a été admis que l'éblouissement d'inconfort est fonction de quatre principaux paramètres :

- ✧ la luminance de la source dans la direction de l'observateur,
- ✧ l'angle solide sous lequel cette source est visible depuis l'œil de l'observateur,

- ✧ la position de la source par rapport à l'axe de vue,
- ✧ la luminance de l'environnement dans le champ visuel de l'observateur.

La figure suivante montre la superposition d'un exemple de spectre de deux LED blanches avec le spectre de sensibilité à l'éblouissement d'inconfort pour un être humain. Ce spectre de sensibilité à l'éblouissement d'inconfort a été publié récemment par l'équipe de János Schanda (Judit Fekete et al. "Discomfort Glare Spectral Sensitivity", Light & Engineering, Vol. 18, N° 2, 2010).

La similitude entre les spectres est importante, montrant l'importance sur le plan du confort visuel du problème de l'éblouissement avec des systèmes d'éclairage à LED.



**Spectre de sensibilité de l'œil humain à l'éblouissement d'inconfort (en blanc),  
superposé à des spectres de LED blanches (en noir)**

---

## **8 - SOLUTIONS POUR ÉVITER L'ÉBLOUISSEMENT**

---

Le critère basé sur la source responsable de l'éblouissement conduit à deux types d'éblouissement :

- ✧ l'éblouissement direct : causé par les fortes luminances des lampes, des luminaires ou des ouvertures
- ✧ l'éblouissement indirect : causé par les luminances réfléchies par des surfaces dont la réflexion lumineuse présente une forte composante spéculaire (réflexion de type miroir)

Selon l'activité pratiquée, il n'est pas nécessaire de chercher à contrôler l'éblouissement de la même façon. C'est pourquoi il a été défini des classes de qualité (de A à E, voir tableau suivant).



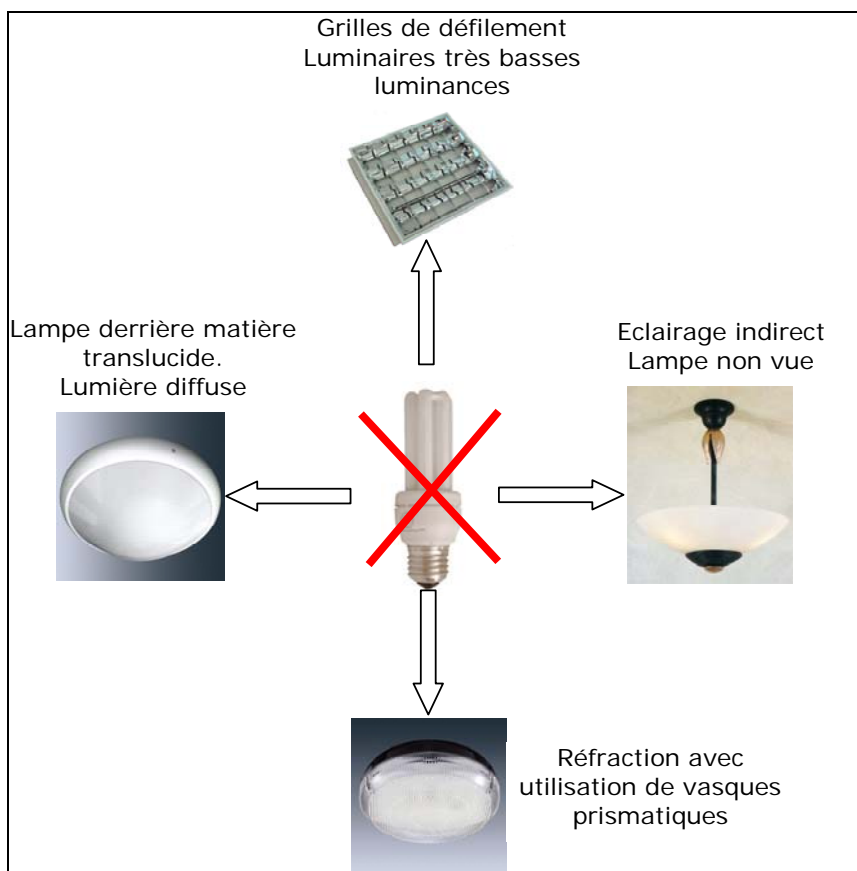
CLASSE DE QUALITÉ	TÂCHES OU ACTIVITÉS
<b>A</b>	Exécution de tâches visuelles très exigeantes, par exemple assemblages électroniques
<b>B</b>	Exécution de tâches avec des exigences visuelles, par exemple contrôle fin. Exécution de tâches avec des exigences visuelles modérées mais demandant une concentration importante et continue, par exemple travail de bureau, assemblage de composants de petites tailles.
<b>C</b>	Exécution de tâches avec des exigences visuelles ou une concentration modérées, par exemple travail d'atelier en position assise, assemblage de pièces de taille moyenne pour un travailleur debout.
<b>D</b>	Exécution de tâches avec des exigences visuelles simples exigeant une concentration normale pour des travailleurs qui se déplacent dans une zone très limitée, par exemple manutention de service autour d'une grosse machine, montage de pièces de dimensions importantes.
<b>E</b>	Locaux dans lesquels les personnes n'ont pas de poste de travail fixe, elles se déplacent pour exécuter des tâches de très faibles exigences visuelles. Locaux qui ne sont pas utilisés de façon continue par les mêmes personnes.

#### Évaluation des classes de qualité relatives à la limitation de l'éblouissement.

##### (Publication AFE "Recommandations relatives à l'éclairage intérieur des lieux de travail")

La limitation de l'éblouissement direct (des sources) peut se faire soit par l'utilisation de luminaires "basse luminance" ou "très basse luminance" soit par la mise en place d'un matériau translucide entre la source et l'observateur, soit en faisant appel à un éclairage indirect (à condition que la source éclaire un matériau qui ne fasse pas apparaître l'image de la source).

Si une lampe nue est utilisée dans un luminaire, elle est susceptible de constituer une source d'éblouissement pour les occupants de la pièce. On doit avoir recours à des systèmes permettant de contrôler la lumière ainsi que sa répartition dans l'espace. Différentes techniques sont utilisées en fonction des applications et des puissances électriques en jeu.



#### Éviter l'éblouissement direct par l'emploi de luminaires adaptés

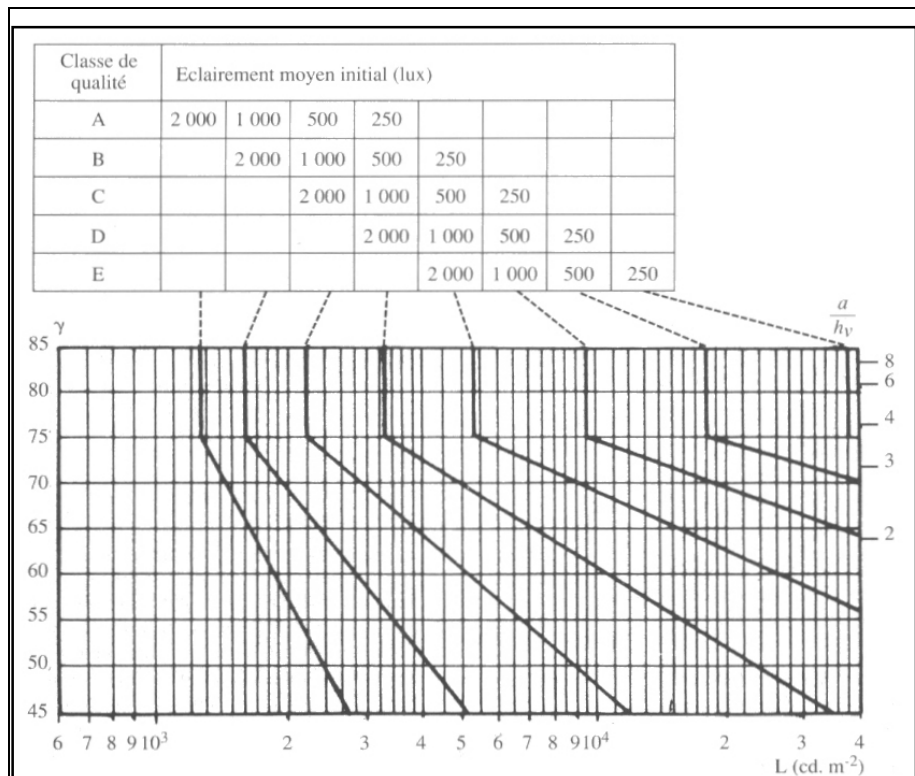
Pour limiter l'éblouissement indirect il est recommandé que les revêtements des différentes parois du local soient les plus mats possible ; ceci est tout particulièrement nécessaire dans la zone du plan de travail à proximité de la tâche visuelle.

## 9 - ÉVALUATION DE L'ÉBLOUISSEMENT

### 9.1 - Les abaques de Bodmann et Söllner

Les abaques de Bodmann et Söllner dont celles du cas général donné sur la figure suivante. Si la courbe de distribution de la luminance d'un luminaire en fonction de l'angle (courbe fournie par le fabricant) se trouve à la gauche de la courbe seuil correspondant à la classe de qualité et à l'éclairement moyen initial sur le plan utile, le luminaire est adapté à la fonction et on ne risque pas d'éblouissement d'inconfort. Cette méthode est recommandée en France par l'AFE.

Le point "faible" de cet abaque réside dans le fait qu'elle a été établie pour des situations "standards" contrairement au calcul de l'indice UGR qui doit être fait en prenant en compte les caractéristiques exactes de l'implantation des luminaires.



**Abaque de Bodmann et Söllner, pour une implantation régulière des luminaires**

## 9.2 - CGI, CIE Glare Index

Cet indice est abandonné au profit de l'UGR mais possède cependant des propriétés qu'il est intéressant de citer ici. Une formulation d'un indice d'éblouissement a été proposée en 1983 dans la publication CIE 83 par Einhorn. L'indice CGI (CIE Glare Index) a subi quelques modifications afin de s'ajuster aux index précédemment proposés (le British Glare Index et le South African Discomfort Index) pour aboutir à la formulation de l'équation suivante :

$$CGI = 8 \cdot \log \left( 2 \cdot \frac{1 + E_d/500}{E_d + E_i} \cdot \sum_{\text{nb sources}} \frac{L^2 \Omega}{P^2} \right)$$

avec :

$E_d$  et  $E_i$ , respectivement l'éclairement direct et indirect d'un élément de surface situé dans le plan de l'œil et orienté selon l'axe de vision,

$L$  est la luminance d'un luminaire dans la direction de l'observateur

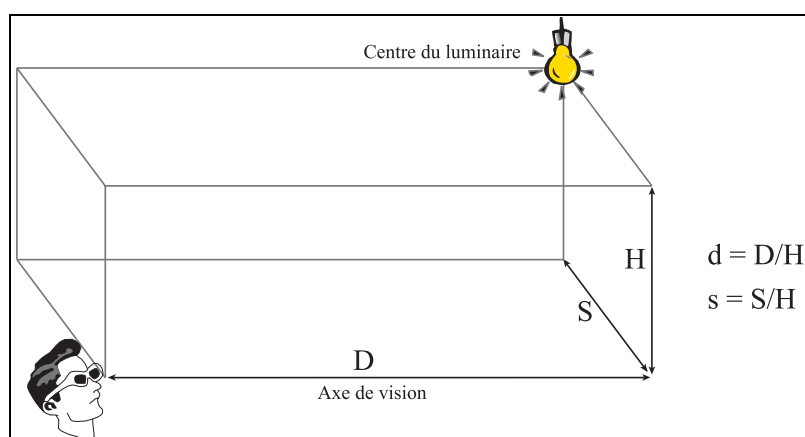
$\Omega$  représente l'angle solide sous lequel ce luminaire est perçu par l'œil,

$P$  est l'indice de position de Guth, il détermine l'influence du luminaire en fonction de sa position dans le champ visuel de l'observateur.

Variante entre 1 pour la direction face au sujet et 16 pour l'extérieur du champ visuel, l'indice de position de Guth restreint l'influence de l'éblouissement d'inconfort au champ visuel  $[0^\circ, 40^\circ]$ . Son expression est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{1}{P} = \left( \frac{d^2}{d^2 + 1,5 \cdot d + 4,6} - 0,12 \right) \cdot \exp(-0,28 \cdot s^2/d + 0,011 \cdot s^3/d) + 0,12$$

où  $s$  et  $d$  repèrent la position du luminaire par rapport à l'axe de vision, comme l'illustre la figure suivante.



#### Définition du repère local lié à l'observateur pour le calcul de l'indice de Guth

Une échelle de la sensation subjective de l'éblouissement en fonction de cet indice a été établie, elle s'étend de "juste perceptible" à "juste intolérable". Les différentes valeurs intermédiaires sont représentées dans le tableau suivant :

SENSATION D'ÉBLOUISSEMENT	CIE GLARE INDEX
Juste intolérable	600
Juste inconfortable	150
Juste acceptable	35
Juste perceptible	8

Valeurs de CGI correspondant aux seuils de sensation d'éblouissement

### 9.3 - UGR, Unified Glare Rating

L'index CGI a été abandonné quelques années plus tard au profit de l'UGR (Unified Glare Rating) défini dans la publication CIE 117 de 1995. L'indice proposé par Einhorn avait été jugé trop complexe à mettre en œuvre pour la construction des incontournables abaques. La formulation de l'UGR est toutefois basée sur le même principe, elle est donnée par l'équation suivante :

$$UGR = 8 \log \left[ \frac{0,25}{L_b} \cdot \sum_{nb \text{ sources}} \frac{L^2 \Omega}{P^2} \right]$$

$L_b$  représente la luminance moyenne du fond. Contrairement à l'index CGI, cette valeur ne prend pas en compte l'éclairage direct. En effet,  $L_b$  est donnée par la formule simple :

$$L_b = \frac{E_i}{\pi}$$

où  $E_i$  est l'éclairement vertical indirect au niveau de l'œil de l'observateur.

Les autres paramètres sont les mêmes que ceux utilisés pour l'index CGI :

$L$  : luminance des parties lumineuses de chaque luminaire dans la direction de l'œil de l'observateur en  $cd/m^2$ ,

$\omega$  : angle solide (stéradian) des parties lumineuses de chaque luminaire au niveau de l'œil de l'observateur,

$P$  : indice de position de Guth

Les principales caractéristiques de l'UGR sont :

- ✧ l'échelle retenue va de 10 (absence d'éblouissement) à 30 (éblouissement intolérable)
- ✧ des écarts inférieurs à 3 points ne sont pas significatifs
- ✧ les valeurs repères sont 13, 16, 19, 22, 25 et 28

ÉCLAIRAGE DES BUREAUX	
Type d'intérieur, tâche ou activité	UGR
Classement, transcription	19
Écriture, dactylographie, lecture, traitement de données	19
Dessin industriel	16
Stations de travail de conception assistée par ordinateur	16
Salles de conférence et de réunion	19
Réception	22
Archives	22

#### Valeurs maximales de l'indice UGR données dans la norme NF EN 12464-1

L'utilisation de l'UGR pour déterminer l'éblouissement est cependant assujettie à certaines contraintes car cette formulation a été construite pour des luminaires de taille moyenne. Ainsi l'indice d'éblouissement des petites sources (angle solide < 0,0003

stéradian) est largement surestimé alors que celui des sources de grandes surfaces (angle solide > 0,1 stéradian), au contraire, est trop faible.

Ces limites sont très contraignantes car elles correspondent à des cas assez courants :

- ✧ luminaire de 1 mètre de long vu à moins de 3 mètres de distance,
- ✧ une LED individuelle de 1,5 mm de diamètre vue à la distance de plus de 8 cm.

De la même manière, cet indice ne peut pas être utilisé pour l'évaluation de l'éblouissement lié à l'éclairage indirect. Dans certains espaces pourtant, l'emploi de sources halogènes indirectes provoque de très fortes luminances au niveau du plafond et ce type d'éclairage s'avère très éblouissant.

### DISCUSSIONS CONCERNANT L'UGR

Différentes réactions ont suivi la publication par la CIE, du nouvel indice d'éblouissement UGR de la publication CIE de 1995. Elles concernent principalement la validité de l'échelle subjective associée à cet indice ainsi que la prise en compte d'environnements composés de multiples sources.

A la suite d'expérimentations qu'il a effectuées, Akashi suggère une modification des seuils de perceptions associés à l'indice UGR. Il fait remarquer que l'évaluation de l'éblouissement par des individus "non experts" diffère de celle de personnes plus avisées. Cette différence d'appréciation s'applique également entre des observateurs de différents pays et cultures.

Toujours à partir de ses résultats d'études, il fait remarquer que l'indice UGR surestime l'éblouissement lorsque le nombre de luminaires augmente. Il propose donc une nouvelle formulation pour cet indice, faisant intervenir le nombre de luminaires installés ( $n$ ) :

$$\text{UGR} = 8 \cdot n^{-0,0060} \cdot \log \left[ \frac{0,25}{L_b} \cdot \sum_{\text{nb sources}} \frac{L^2 \Omega}{P^2} \right]$$

Einhorn s'est opposé aux propositions formulées par Akashi. Il rappelle l'importance de certaines propriétés vérifiées par la formulation de l'UGR : la décomposition d'un luminaire en éléments de surface ne doit pas modifier l'indice d'éblouissement. Ainsi :

- ✧ l'angle solide  $\Omega$  associé à chaque source doit rester à la puissance unitaire,
- ✧ le nombre de luminaires installés ne doit pas intervenir dans la formulation de l'UGR.

Il conteste également le souhait de Akashi et al de modifier l'échelle subjective associée à l'UGR, selon lui il s'agit plus d'un décalage sémantique que d'une différence réelle entre l'appréciation subjective d'observateurs "experts" ou non. Einhorn propose au contraire de calibrer les résultats expérimentaux par rapport aux valeurs actuelles qui ont été validées dans des situations réelles. Par contre, en pratique, il est tout à fait envisageable que chaque pays définisse ses propres limites en fonction de l'activité exercée et de la sensibilité des utilisateurs.

Selon Einhorn, il est souhaitable de faire intervenir l'éclairage direct dans la détermination de la luminance de fond  $L_b$ . En effet, celle-ci fait pleinement partie du champ visuel de l'observateur et sa prise en compte est physiquement plus cohérente, sur ce point l'indice CGI qu'il avait proposé dans la publication CIE 83 était plus complet.

Les remarques formulées par Einhorn semblent très cohérentes car les modifications qu'il suggère ne sont pas source d'anomalies lorsque le nombre de luminaires augmente. Son approche est très physique et ne s'appuie pas seulement sur une analyse statistique des résultats expérimentaux pour la création d'une "formule magique". Il semble préférable comme il l'indique, d'utiliser l'indice UGR tel qu'il est, avec toutes ses limitations en attendant mieux.

Les recherches menées actuellement tentent de combler certaines lacunes concernant la prise en compte de luminaires de très petite ou de très grande taille. Le résultat de ces études pourrait d'ailleurs être applicable à l'évaluation de l'éblouissement généré par l'éclairage indirect.

---

## 10 - COULEUR ET INDICE DE RENDU DES COULEURS DES SOURCES

---

La notion de rendu de couleur est abordée plus généralement dans la tâche T2.3 du projet CITADEL. Cependant, on explique ici son importance dans le contexte des exigences de confort visuel.

La température de couleur  $T_c$  d'une source lumineuse correspond à la température du corps noir, exprimée en kelvins (notés K), dont l'émission lumineuse présenterait exactement la même couleur apparente que celle de la source. Dans le cas où la couleur de la source à caractériser et celle du corps noir ne seraient pas exactement les mêmes, on parle de température de couleur proximale  $T_{cp}$  ; c'est les cas des lampes courantes.

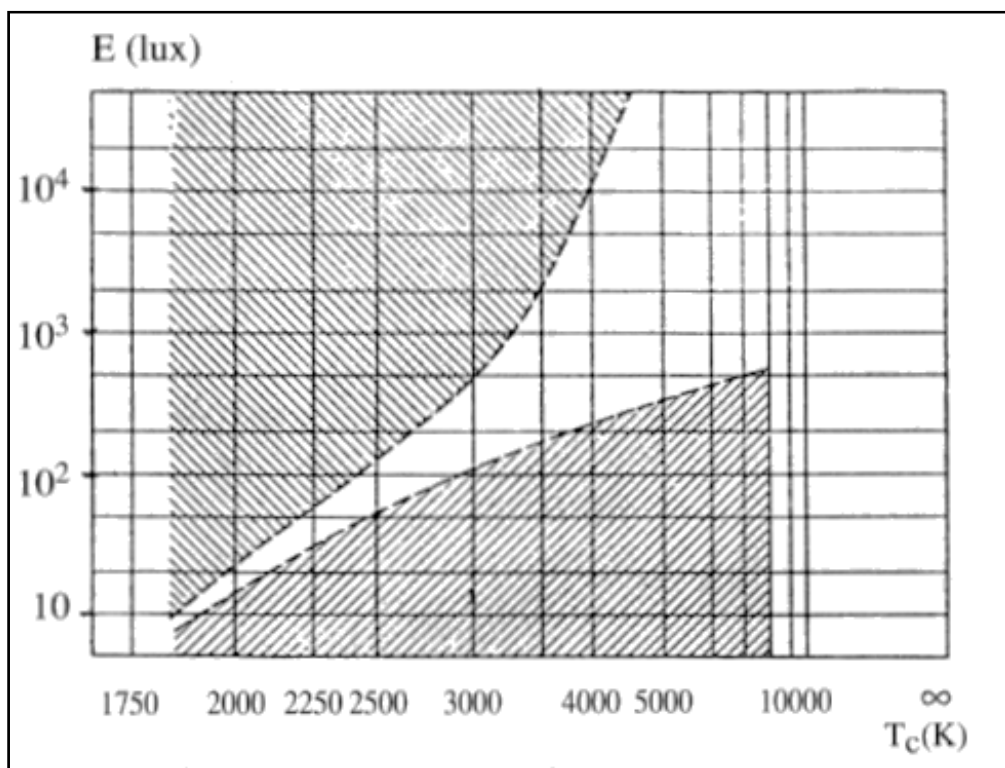
Pour caractériser l'ambiance lumineuse produite par une source, on fait en général référence à la notion de teinte ; la relation entre la teinte et la température de couleur est celle du tableau suivant.

TEINTES	$T_{cp}$
Chaudes	$T_{cp} \leq 3300 \text{ K}$
Intermédiaires (ou neutres)	$3300 \text{ K} < T_{cp} \leq 5300 \text{ K}$
Froides	$T_{cp} > 5300 \text{ K}$

### Relation entre teinte et température de couleur

La notion de température de couleur de source doit aussi être associée au niveau d'éclairement souhaité ; à partir d'études sur sujet, il a été montré que plus le niveau

d'éclairement est élevé, plus la température de couleur de la lumière doit être élevée. Ceci est illustré par le diagramme de Kruithoff de la figure suivante :



**Diagramme de Kruithoff - Relation entre éclairement et température de couleur**

**Les zones hachurées correspondent à une sensation "désagréable"**

Le rendu des couleurs de la lumière émise par une source est obtenu par comparaison de l'analyse de la lumière réfléchie par des échantillons colorés avec celle réfléchie par ces mêmes échantillons éclairés avec une source de référence.

Pour caractériser le rendu des couleurs, on utilise la notion d'indice de rendu des couleurs (noté IRC ou  $R_a$ ). Il représente la capacité qu'a une source à rendre compte de l'aspect coloré des objets. Si on ne relève pas de différence entre l'observation sous la source à caractériser et celle sous la source de référence, l'indice de rendu des couleurs vaut 100. En dessous de la valeur 50, la notion d'indice de rendu des couleurs n'a plus de sens.

En fonction de l'activité pratiquée, la source utilisée devra avoir l'indice de rendu des couleurs minimum donné dans le tableau suivant :



QUALITÉ DÉSIRÉE	IRC LIMITE	EXEMPLES D'APPLICATION
Appréciation primordiale aussi exacte que possible des couleurs Excellent rendu des couleurs	$IRC \geq 90$	Contrôle, sélection, examen... Laboratoires Industrie textile Imprimerie Produits agricoles
Rendu des couleurs de bonne qualité	$IRC \geq 80$	Ateliers Bureaux Écoles Magasins de vente
Rendu des couleurs médiocre mais secondaire	$IRC \geq 60$	Industrie : ateliers, mécanique...
Aucune exigence de rendu des couleurs	$IRC < 60$	Industrie : fonderies, grosse mécanique Magasins de stockage

**Relation entre l'activité pratiquée et l'indice de rendu des couleurs**  
**(Publication AFE "Recommandations relatives à l'éclairage intérieur des lieux de travail")**